



PCT

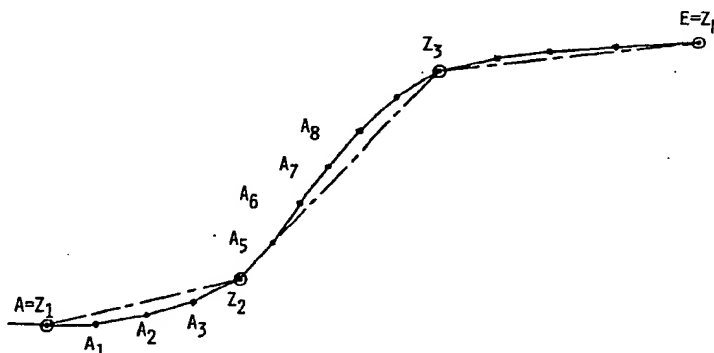
WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro

INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation <sup>5</sup> :  G06F 15/353	A2	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 93/17392 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 2. September 1993 (02.09.93)
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE93/00159 (22) Internationales Anmeldedatum: 24. Februar 1993 (24.02.93) (30) Prioritätsdaten: P 42 05 603.9 24. Februar 1992 (24.02.92) DE (71)(72) Anmelder und Erfinder: HECKMANN, Hansjörg [DE/DE]; Alpenstraße 5, D-7950 Biberach (DE). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US) : HECKMANN, Ingeborg [DE/DE]; Alpenstraße 5, D-7950 Biberach (DE). (74) Anwalt: KÖNIG, Beate; Morassistraße 8, D-8000 München 5 (DE).		(81) Bestimmungsstaaten: AU, BB, BG, BR, CA, FI, HU, JP, KP, KR, LK, MG, MN, MW, NO, PL, RO, RU, SD, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, SN, TD, TG).  Veröffentlicht Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.

(54) Title: PROCESS FOR MAKING TRACKING DEVICES AND TRAFFIC LANES FOR VEHICLES AND PROCESS FOR THE CONSTRUCTION OF OBJECTS

(54) Bezeichnung: VERFAHREN FÜR DEN BAU VON SPURFÜHRUNGSEINRICHTUNGEN UND VERKEHRSBÄNDERN FÜR FAHRZEUGE SOWIE VERFAHREN ZUR KONSTRUKTION VON GEGENSTÄNDEN



(57) Abstract

The objects of the invention are a process for making tracking devices and traffic lanes for vehicles and a process for the construction of objects using a CAD system, and a CNC control process. According to the invention, a tracking approximation is made using a process working with directional differences. This leads to more accurate tracking.

(57) Zusammenfassung

Gegenstand der Erfindung sind ein Verfahren für den Bau von Spurführungseinrichtungen und Verkehrsbändern für Fahrzeuge und ein Verfahren zur Konstruktion von Gegenständen unter Verwendung eines CAD-Systems sowie ein Verfahren zur CNC-Steuerung. Erfindungsgemäß ist es vorgesehen, eine Linienführungsapproximation unter Verwendung eines mit Richtungs-differenzen arbeitenden Verfahrens durchzuführen. Dies führt zu höchster Genauigkeit der Linienführung.

# **LEDIGLICH ZUR INFORMATION**

Code, die zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AT	Österreich	FR	Frankreich	MR	Mauritanien
AU	Australien	GA	Gabon	MW	Malawi
BB	Barbados	GB	Vereinigtes Königreich	NL	Niederlande
BE	Belgien	GN	Guinea	NO	Norwegen
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	NZ	Neuseeland
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	PL	Polen
BJ	Benin	IE	Irland	PT	Portugal
BR	Brasilien	IT	Italien	RO	Rumänien
CA	Kanada	JP	Japan	RU	Russische Föderation
CF	Zentrale Afrikanische Republik	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	SD	Sudan
CG	Kongo	KR	Republik Korea	SE	Schweden
CH	Schweiz	KZ	Kasachstan	SK	Slowakischen Republik
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	SN	Senegal
CM	Kamerun	LK	Sri Lanka	SU	Soviet Union
CS	Tschechoslowakei	LU	Luxemburg	TD	Tschad
CZ	Tschechischen Republik	MC	Monaco	TG	Togo
DE	Deutschland	MG	Madagaskar	UA	Ukraine
DK	Dänemark	ML	Mali	US	Vereinigte Staaten von Amerika
ES	Spanien	MN	Mongolei	VN	Vietnam
FI	Finnland				

VERFAHREN FÜR DEN BAU VON SPURFÜHRUNGSEINRICHTUNGEN UND  
VERKEHRSBÄNDERN FÜR FAHRZEUGE SOWIE VERFAHREN ZUR  
KONSTRUKTION VON GEGENSTÄNDEN

---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren für den Bau von Spurführungseinrichtungen und Verkehrsbändern für Fahrzeuge, ferner ein Verfahren zur Konstruktion von Gegenständen unter Verwendung eines CAD-Systems und zur CNC-Steuerung.

Zur Planung und Absteckung der Achse oder Trasse von Verkehrsbändern wie Straßen, Eisenbahngleisanlagen, etc. werden anhand von graphischen Vorentwürfen die Einzelplanungen durchgeführt. Hierbei sind die Zwangspunkte, durch die die Trasse zu führen ist, zu berücksichtigen.

Es ist bekannt, für die Erstkonzepte bei derartigen Trassierungsarbeiten Geraden (mit Krümmung Null) und Kreisabschnit-

**ERSATZBLATT**

te (mit konstanter Krümmung) sowie als weitere selbständige Elemente oder als Übergangsbögen Klotoiden (mit sich linear ändernder Krümmung) zu verwenden. Durch derartige Übergangsbögen soll ein ruckartiges Auftreten von Fliehkraftänderungen zwischen den einzelnen Trassenabschnitten bzw. -elementen verhindert oder jedenfalls minimiert werden. Sind die Krümmungsübergänge zwischen den einzelnen Trassenelementen nämlich nicht ausreichend glatt, kommt es zu solchen ruckartigen Stößen und zu einem instabilen Fahrbetrieb und einer Beeinträchtigung des Fahrgefühls sowie ferner zu nachteiligen Beanspruchungen z.B. der Schienen, die an den betreffenden Stellen infolge der sich ändernden Massekräfte einem erhöhten Verschleiß unterliegen.

Zur Vermeidung solcher Stöße werden vielfach flache Kreisbögen bei der Trassierung verwendet. Dennoch sind die Übergänge häufig nicht ausreichend glatt und die Fahrgeschwindigkeit muß infolge zu hoher Seitenbeschleunigung herabgesetzt werden.

Trassierungsentwürfe werden derzeit mit interaktiver Computerunterstützung durchgeführt, wobei die Erstkonzepte gewöhnlich wie oben beschrieben erstellt werden. Die Optimierung der Entwürfe entsprechend den geometrischen und technischen Erfordernissen erfolgt dabei im wesentlichen empirisch, z.T. sogar durch handwerkliche Maßnahmen vor Ort. Daher geht die Erfahrung des jeweiligen Bearbeiters entscheidend in den Fortgang der Trassierungsarbeiten ein.

Die rechnerische Ausarbeitung von Trassierungsentwürfen besteht derzeit darin, daß Polynomapproximationen mit den Zwangspunkten als Schnittstellen verwendet werden (vgl. z.B. M. Ingwersen und T. Rickert, "Neue Trassierungstechnik für Nahverkehrsbahnen", ZfV 2, 1990, Seiten 60 bis 68; H. Schmidt, "Übergangsbogenberechnung durch numerische Integration mit einer Quadraturformel von Gauß", VR 53/8, 1991,

Seiten 361 bis 372). So verwenden Ingwersen und Rickert ein Tangentenpolygon. Zur Straßenachsberechnung aus Klotoiden werden z.B. Fresnelsche Integrale für die X-, Y-Koordinaten der Klotoideneinzelpunkte bezüglich der langen Tangente entwickelt. Es handelt sich hierbei um asymptotische Berechnungen. Die Fresnelschen Integrale sind geschlossen nicht lösbar und werden daher als Reihenentwicklungen mit Abbruch der Reihe nach dem dritten oder vierten Glied numerisch berechnet. Zur Bestimmung der fahrdynamisch günstigsten Trasse muß dementsprechend bei einer großen Zahl von Zwangspunkten ein erheblicher Arbeits- und Rechenaufwand betrieben werden. Herkömmlich wird davon ausgegangen, daß sich die Näherungsfehler bei einer Kombination von mehreren berechneten Trassenelementen addieren.

Von H. Heckmann ist in "Ein Algorithmus zur Trassenberechnung auf EDV-Anlagen", AVN 1/90, Seiten 19 bis 26, 1990 ein Trassenalgorithmus vorgeschlagen worden, bei dem Stationspunkte auf Geraden als Eckpunkte eines gleichseitigen Vielecks mit konstanter Richtung gerechnet werden. Stationspunkte auf Kreisen werden als Eckpunkte eines gleichseitigen Vielecks mit konstanter Richtungsänderung gerechnet. Stationspunkte auf Übergangsbögen werden als Eckpunkte eines gleichseitigen Vielecks mit konstanter zweiter Änderung der Richtung gerechnet. Hierdurch entsteht ein Algorithmus, der über gesetzmäßig sich ändernde Richtungsänderungen gesteuert, fortlaufend die Koordinaten gleich weit voneinander entfernter Stationspunkte auf der Trassenachse erzeugt. Dies erfolgt für Geraden, Übergangsbögen und Kreise nach demselben Arbeitsprinzip, d.h. die Koordinaten werden nach einem einheitlichen Bildungsgesetz erzeugt. Die gleichabständigen Achspunkte können daher auf aneinander tangierende Folgen von Geraden, Übergangsbögen und Kreisen gelegt werden. Man kann sich mit diesem Algorithmus auf der Trassenachse entlangbewegen und in gleich großen Abständen direkt die Landes- oder Gauß-Krüger-Koordinaten oder sonstige rechtwink-

lige Koordinaten der Achspunkte erzeugen. Der Punktabstand AN, die konstante Schrittweite des Richtungsdivergenzalgorithmus, kann 20m, 10m, 5m, 2m oder weniger betragen.

Wie in dem oben genannten Aufsatz ausgeführt ist, liegen die maximalen Abweichungen der so bestimmten Trassierung von einer idealen Trassierung für Schrittweiten von z.B.  $AN = 5\text{ m}$  bei wenigen cm in dem für die praktische Verwendung des Übergangsbogens vorgesehenen Bereich. Jedenfalls kann durch Verkleinerung der Schrittweite eine beliebige Annäherung an Tafelwerke erzielt werden, die die Ergebnisse von Taylorreihen-Berechnungen mit siebenstelligen Koordinatenwerten enthalten (Kasper, Schürba, Lorenz, "Die Klottoide als Trassierungselement", Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1968).

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur genauen Trassenbestimmung zu schaffen, das eine einfache Herstellung von Hochgeschwindigkeitstrassen mit minimaler Maximalkrümmung ermöglicht. Eine solche Trasse ergibt eine minimale Seitenbeschleunigung und kleinstmöglichen Verschleiß.

Diese Aufgabe ist erfindungsgemäß bei einem Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Varianten und Anwendungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind Gegenstand der abhängigen und weiteren Ansprüche.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren für den Bau von Spurführungseinrichtungen und Verkehrsbändern für Fahrzeuge, wird somit der Trassenverlauf räumlich durch Anfangs- und Endpunkte bestimmt. Der Trassenverlauf wird mittels einer Verarbeitungseinrichtung unter Anwendung eines Richtungsdivergenzverfahrens bestimmt derart, daß die Trassenkrümmung und Krümmungsänderung vorgegebene Werte für ein stabiles Fahrverhalten der Fahrzeuge nicht überschreiten. Erfindungsgemäß wird der Trassenverlauf im Gelände durch Tras-

senzzwischenpunkte sukzessive festgelegt. Die Trassenzwischenpunkte werden durch Trassenabschnitte verbunden. Bestimmte Abstände zwischen den Trassenpunkten und die erste, zweite sowie dritte Richtungsdivergenz werden bei diesem Verfahren so festgelegt, daß sie die vorgegebenen Zwangspunkte enthalten.

Bei dem erfindungsgemäßen Trassierungsverfahren werden somit Trassen durch die Zwangspunkte gelegt. Jede hat eine Stelle, an der ihre Krümmung am größten ist. Diese Maximalkrümmung ist der Kennwert für die Güte der Trasse, d.h. je kleiner die Maximalkrümmung ist, umso besser ist die Trassengüte. Die Trasse mit der kleinsten Maximalkrümmung ist daher anzustreben. Eine äquidistante Punktfolge, die diese Trasse darstellen kann, wird durch das Mikrosehenpolygon erreicht, das durch alle Zwangspunkte geht und dessen maximale Richtungsänderung am kleinsten ist.

Die Geometrie der Trassenachse durch die Eckpunkte des gleichseitigen Sehnepolygons wird durch die Seitenlänge  $AN = \Delta L$ , die Richtungsdivergenz  $DRI = \Delta \tau$  und die Änderung der Richtungsdivergenz  $D2RI = \Delta^2 \tau$  beschrieben.

Das erfindungsgemäße Trassierungsverfahren zeichnet sich durch eine außerordentlich hohe Genauigkeit aus. Es ist z.B. möglich, die Trassierung einer Kreisbahn mit 400 km Umfang mit einer Genauigkeit von ca. 5  $\mu\text{m}$  im Anfangs/Endpunkt der Trassierung durchzuführen.

Ein Vergleich des Verfahrens mit Tafeln der Fresnelschen Integralen zeigte: Die Vergleichsrechnung über äquidistante Punkte mit konstanter zweiter Differenz der Richtung gemäß Erfindung brachte in allen Fällen bis zu den größten Bogenlängen und bis zur letzten Stelle die Werte, die in den veröffentlichten Tafeln der Fresnelschen Integrale stehen.

Die Einfachheit der erfindungsgemäßen Trassenbestimmung beruht darauf, daß die Trassenelementpunkte durch die Hypotenusen rechtwinkliger Dreiecke festgelegt werden (vgl. Fig. 3), wobei gemäß einer bevorzugten Ausführungsvariante die Punkte in äquidistanten Abständen angeordnet werden. Dabei liegen die Knickpunkte des bestimmten Sehnenpolygons auf der Bahnkurve. Die gewählten kleinen Seitenlängen des Mikrosehnenpolygons ermöglichen einen glatten Kurvenanschluß. Da die Zwangspunkte gleichzeitig die erwähnten Knickpunkte sind, kommt es zu einem glatten Verlauf der auf das Fahrzeug wirkenden Fliehkräfte. D.h. die zur Wirkung gelangenden Fliehkräfte sind minimal. Dies führt im Fall einer Bahntrasse zu einer minimalen Gleisbeanspruchung.

Das erfindungsgemäße Verfahren macht von einer Interpolation zwischen den Zwangspunkten Gebrauch, wobei die Krümmung und Krümmungsänderung zwischen den Zwangspunkten gesetzmäßig gesteuert wird. Bei herkömmlich verwendeten Polynomapproximationen kann es hingegen zu funktionsbedingten Abweichungen (Welligkeit, Ausbrechen) zwischen den Stützpunkten kommen und die Krümmung kann an manchen Stellen sehr groß werden. Dies würde wiederum zu ungewünschten Stößen und Beanspruchungen bei der Fahrdynamik führen.

Gemäß einer Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens werden Richtung und Krümmung der Trasse bzw. Oberfläche in einem Zwangspunkt durch den Kreis bestimmt, der durch den Zwangspunkt und seine beiden Zwangspunktnachbarn geht. Der Kreis durch den Zwangspunkt und seine beiden Zwangspunktnachbarn ist die Linie kleinster, maximaler Krümmung, die durch diese drei Zwangspunkte geht, d.h. die Linie mit kleinstem, maximalen Lenkradanschlag und damit größter Fahrstabilität und kleinstem Verschleiß.



Die Funktion des erfindungsgemäßen Verfahrens wird nachstehend anhand der Digitalisierung der Krümmung der ermittelten Trasse mittels Richtungs differenzen weiter erläutert.

Auf einer fertiggestellten kontinuierlich gekrümmten glatten Trassenachse kann man mit dem Meßband Punkte markieren, die voneinander immer denselben räumlichen Abstand AN von z.B. 5m haben. Diese räumlichen Äquidistanzpunkte könnten ohne weiteres zur üblichen punktweisen Absteckung der Trassenachse benutzt werden. Untereinander sind sie durch ein gleichseitiges Sehnenvieleck mit der Seitenlänge AN verbunden. Ihre gegenseitige Lage in der Ebene ist durch die Richtungswinkel der gleich langen Sehnen und die Änderung DRI dieser Richtungswinkel von Äquidistanzpunkt zu Äquidistanzpunkt festgelegt. Auf geraden Trassenabschnitten ist diese Richtung unverändert konstant (vgl. Fig. 3). Auf kreisförmigen Trassenabschnitten ändert sich die Richtung nach jedem Sehnenstück AN um den Betrag DRI (vgl. Fig. 4). AN und DRI bestimmen über die Sehnenformel  $AN = 2 \cdot R \cdot \sin(DRI/2)$  die Krümmung und den Radius R des Kreisbogenstücks an dieser Stelle. Das als Zwischenergebnis anfallende DRI ergibt über der Stationierung in geeignetem Maßstab laufend aufgetragen, das Krümmungsbild der Trasse. DRI kann wie der Radius R positiv und negativ sein. Auf Übergangsbögen der einfachsten Art nimmt die Richtungsänderung nach jeder Sehnenlänge um D2RI zu, wobei nach [H. Heckmann, a.a.O.]  $D2RI = (AN)^2 / A^2$  den Parameter A des Übergangsbogens bestimmt (vgl. Fig. 5). Die zweite Änderung der Richtung D2RI kann positiv und negativ sein.

Mit diesen Richtungswinkeln und ihren Differenzen läßt sich die Trasse im Geraden- und Kreisbereich mathematisch exakt und mit überraschend hoher Rechengenauigkeit bestimmen. Im Übergangsbogenbereich wird die fahrdynamisch sanktionierte Klotoide mit mindestens der Genauigkeit erreicht, die die Praxis haben will, da mehr als siebenstellige Tafeln, mit

denen verglichen werden könnte, nicht vorhanden sind. Die mit der zweistufigen Rekursion erzeugte äquidistante Punktfolge ist also mindestens so genau wie die von der Praxis verwendete Klottoide. Die auf die Anwendung gerichtete Betrachtung kann an dieser Stelle abbrechen.

Wenn man 3., 4., ...n. Differenzen der Richtung einführt, also die Zahl der Stufen der Rekursion entsprechend erhöht, gelangt man zu Übergangsbögen höherer Ordnung, bei denen sich die Drehgestelle der Eisenbahnwagen weich zu drehen beginnen. Die Gleise verschleiben dadurch weniger. Im FORTRAN-Programm ist das jeweils eine zusätzliche Zeile in der Krümmungskaskade.

Eine weitere Überprüfung des erfindungsgemäßen Trassierungsverfahrens wurde anhand der Cornu-Spirale vorgenommen.

Bei der in der Fresnelschen Beugungstheorie wichtigen Cornu-Spirale ist die Krümmung der vom Windungspunkt aus gemessenen Bogenlänge proportional. Die Cornu-Spirale ist eine Klottoide mit dem speziellen Parameter  $A=1/\sqrt{\pi} \approx 0,5642$ . Sie gilt als besonders elegante Darstellung der "sehr ausgiebig untersuchten" Fresnelschen Integrale [Born, M.: Principles of Optics, Pergamon Press Oxford, U.K., 1989; Hecht, E.: Optics, Addison-Wesley, Reading, MA 1990]

$$y(L) = \int_0^L \sin\left(\frac{\pi}{2} l^2\right) dl$$

$$x(L) = \int_0^L \cos\left(\frac{\pi}{2} l^2\right) dl$$

Integrationsvariable  $l$ , obere Integrationsgrenze  $L$ .

Zu diesem Zweck wurden eine Einheitsklotoide und Cornu-Spirale mit Richtungs differenzen gezeichnet. Das dazu nötige FORTRAN-Quellenprogramm ist 14 Zeilen lang. Es erzeugt die für den Plotter erforderlichen Steuerbefehle in Hewlett-Packard Graphics Language (HP-GL):

```

      OPEN(2,FILE='COM1:')
      IY=0
      IX=0
      AN=100.0
      RIANBO=0.0
      DRBO=0.0
      WRITE(2,*)'IN;SP1;PA0,0;'
100  IY=IY+AN*SIN(RIANBO)
      IX=IX+AN*COS(RIANBO)
      WRITE(2,*)'PD',IY,',',IX,','
      DRBO=DRBO+0.00015625
      RIANBO=RIANBO+DRBO
      GO TO 100
      END

```

Beim Produktionslauf sendet dieses Programm über die serielle Schnittstelle COM1 an den HP 7586 DIN A0-Plotter folgende Befehle in HP-GL:

```

IN;SP1;PA0,0;
PD      0,      100;
PD      0,      199;
PD      0,      298;
PD      0,      397;
PD      0,      496;
.....

```

Wie in Fig. 6 veranschaulicht ist, entsteht eine Spirale von ästhetischem Ebenmaß, die die Leistungsfähigkeit des Richtungs differenzenverfahren erkennen läßt.

Die Flexibilität von Anwendungen mit vorgegebenen Richtungs differenzen höherer Ordnung veranschaulicht Fig. 7 am Beispiel einer Hyperklotoiden für die dritte Richtungs differenz.

Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich insbesondere zur Herstellung von Hochgeschwindigkeits-Trassen (Schnell- und Straßenbahnen), einschließlich Schienen, Weichen und von sonstigen Spurführungseinrichtungen schienengebundener Transportmittel, deren Achs- und Oberflächenkoordinaten mittels des Verfahrens der programmgesteuert gekoppelten Richtungs-differenzen berechnet werden. Dies gilt besonders dann, wenn dritte und höhere konstante, aber auch funktionsabhängige Richtungs-differenzen Verwendung finden. Weitere Anwendungen sind die Herstellung von Straßenachsen, die Randabgrenzungen von Straßen sowie sonstige spurgeführte Verkehrsbänder, soweit das Richtungs-differenzenverfahren bei Entwurf und Herstellung verwendet wird. Besondere Vorteile ergeben sich bei enger Bebauung und vielen Zwangspunkten.

Noch weitere Möglichkeiten des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich, wenn zusätzlich die vierte und/oder höhere Richtungs-differenz vorgegeben werden, wobei sich noch die Alternative einer funktionsabhängig bestimmten Richtungsänderungs-differenz ergibt. Schon durch die Vorgabe einer konstanten vierten Differenz kommt es zu einer Vielfalt neuer Anwendungsmöglichkeiten.

Weitere Variationsmöglichkeiten des erfindungsgemäßen Verfahrens umfassen, daß die  $n$ -te Differenz der Richtung konstant ist. Auf diese Weise können als Streckenabschnitte Geraden, Kreise, Klotoiden, Hyperklotoiden, etc. gebildet werden. Andererseits können die Richtungs-differenzen auch funktionsabhängig variiert werden. Ebenso können die Abstände zwischen den Punkten zur Festlegung des Trassenverlaufs variiert werden. Die Werte- bzw. Parametervorgabe kann dabei von Streckenabschnitt zu Streckenabschnitt geändert werden.

Durch die Erfindung ist des weiteren mit Anwendung des Richtungs-differenzverfahrens ein Verfahren zur Konstruktion von Gegenständen unter Verwendung eines CAD-Systems geschaffen

worden. Bei diesem wird die Oberfläche und/oder Form eines herzustellenden Gegenstandes unter Verwendung eines Richtungsdifferenzverfahrens räumlich festgelegt, wobei bestimmte Abstände zwischen den Oberflächenzwischenpunkten und die erste, zweite bis n-te Richtungsdifferenz festgelegt werden.

Hierbei ergeben sich aufgrund der hohen Genauigkeit der Approximation überraschende Formgebungsmöglichkeiten. Es kann jede beliebige gekrümmte Linie und Fläche mit höchster Genauigkeit realisiert werden. Nichtgleichmäßige Krümmungen, wie sie sich bei der Interpolation mit kubischen Splines ergeben (vgl. Fig. 1 aus G. Pomaska, "Computergrafik ...", Seite 108, Vogel-Verlag, Würzburg, 1984), entfallen.

Das erfindungsgemäße Konstruktionsverfahren findet vorteilhaft Anwendung bei der Herstellung von ebenen und räumlichen Industrieerzeugnissen wie Karosserieteilen z.B. von Kraftfahrzeugen und Flugzeugen, deren Oberflächen und Begrenzungen aus gekrümmten ebenen und räumlichen Kurven und Flächen bestehen, deren Linienführung und Flächen mit dem Richtungsdifferenzenverfahren bei Entwurf oder Herstellung berechnet wurden. Als besonders zweckmäßig erweist sich das Verfahren, wenn das Richtungsdifferenzenverfahren zur Steuerung von Herstellungsautomaten Verwendung findet.

Dabei werden mit dem Richtungsdifferenzenverfahren beim Entwurf und der Herstellung schrittweise  $x$ ,  $y$  Koordinaten oder Polarkoordinaten der herzustellenden Linien in fast beliebiger Dichte und fast beliebig kleinem Punktabstand berechnet und zur Steuerung des Herstellungsablaufes verwendet. Die Hereinnahme der dritten Koordinate  $z$  ermöglicht die Ausdehnung auf die Beschreibung und Herstellung räumlicher Gebilde.

Eine sehr vorteilhafte Anwendung der Erfindung besteht in der Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens für CNC-Steuerungen. Durch die so ermöglichte hohe Genauigkeit können neue Gegenstände mit komplizierterer Formgebung gefertigt werden bzw. die Fertigungskosten aufgrund des geringeren Rechenaufwandes und Maschinenverschleißes gesenkt werden.

Sehr vorteilhaft kann das erfindungsgemäße Verfahren zur EDV-gesteuerten Herstellung von Prothesen eingesetzt werden.

Die Erfindung ist in der beiliegenden Zeichnung sowie der nachfolgenden Beschreibung mit Tabellenanhang weiter veranschaulicht. In der Zeichnung zeigen:

- Fig. 1 eine Darstellung einer durch Spline-Interpolation approximierten Archimedischen Spirale,
- Fig. 2 eine schematische Veranschaulichung der erfindungsgemäßen Festlegung von Streckenabschnitten für einen Trassenverlauf,
- Fig. 3 ein Beispiel für die Bestimmung eines Trassenelementes, das eine Gerade darstellt, mittels des Richtungsdivergenzverfahrens,
- Fig. 4 ein Beispiel für die Bestimmung einer Trasse anhand eines Kreisbogens mittels des Richtungsdivergenzverfahrens,
- Fig. 5 ein Beispiel für die Kombination einer Geraden, eines Übergangsbogens und eines Kreises mittels des Richtungsdivergenzverfahrens,
- Fig. 6 ein Beispiel einer mittels des Richtungsdivergenzverfahrens entwickelten Cornu-Spirale,
- Fig. 7 eine Realisierung einer Hyperklotoide,
- Fig. 8 eine Veranschaulichung einer weiteren Variante der erfindungsgemäßen Trassierung und
- Fig. 9 die Kreise durch die Zwangspunkttupel  $Z_{i-1}$ ,  $Z_i$ ,  $Z_{i+1}$ .

Im folgenden werden Fig. 2, 8 und 9 erläutert.

Fig. 2 veranschaulicht die erfindungsgemäße Bestimmung der Trasse. Vorgegeben sind Ort, Richtung und Krümmung im Anfangspunkt A und Endpunkt E sowie die sogenannten Zwangspunkte  $Z_2, Z_3, \dots$ , durch die die Trasse zu führen ist, wobei die Anfangs- und Endpunkte zugleich die Zwangspunkte  $Z_1$  und  $Z_n$  sind. Der strichpunktierte Polygonzug durch die Zwangspunkte zeigt bereits die Richtungsänderungen, die die Trasse durchlaufen muß. Unter Zuhilfenahme des Richtungs-differenzverfahrens werden dann Trassenelemente bestimmt, deren maximale Krümmung kleinstmöglich ist, um die ungewünschten Seitenbeschleunigungsänderungen und damit den Verschleiß etc. auf ein Minimum herabzusetzen. Das gesuchte Trassenelement zwischen zwei Zwangspunkten ist mit ausgezogener Linie dargestellt. Das Trassenelement ist wiederum für den Trassenbau in Abschnitte unterteilt, die jeweils zwei Trassenzwischenpunkte  $A_1, A_2; A_2, A_3, \dots$  verbinden und ein zweites, feineres Mikrosehnenpolygon bilden. Die Seitenlänge dieses Mikrosehnenpolygons ist z.B. 1 m und erlaubt ein direktes Abstecken der Trasse im Gelände.

Fig. 8 veranschaulicht die erfindungsgemäße Trassierung für den Fall, daß durch jeweils drei benachbarte Zwangspunkte  $Z_{i-1}, Z_i, Z_{i+1}; Z_i, Z_{i+1}, Z_{i+2}$  jeweils ein Kreisbogen mit Mittelpunkt  $M_1, M_2$  und Radius  $r_i, r_{i+1}$  gelegt wird. Die Tangente  $T_1, T_2$  im mittleren Zwangspunkt  $Z_i, Z_{i+1}$  liefert dann die Trassenrichtung in diesem Zwangspunkt. Die durch die beiden Zwangspunkte  $Z_1, Z_2$  gelegte Kurve mit derselben Steigung wie die Tangenten  $T_1, T_2$  und mit minimaler Krümmungsänderung ist das gesuchte Trassenelement. Wie die entsprechende durchgezogene Linie in Fig. 8 zeigt, handelt es sich in diesem Fall bei dem Übergangsbogen zwischen den beiden Kreisabschnitten um eine Klotoiden. Das Trassenelement wird schließlich in den bereits erwähnten Mikropolygonzug

mit der für den Bau erforderlichen Sehnenlänge unterteilt.  
Dies ist in Fig. 8 nicht dargestellt.

In Fig. 9 sind die Kreise durch die Zwangspunkttripel  $Z_{i-1}$ ,  $Z_i$ ,  $Z_{i+1}$  gezeigt, die linienförmige Gebiete ausschneiden, in denen die beste Trasse liegt, und für diese im mittleren Zwangspunkt  $Z_i$  Richtung und Krümmung angeben.

Zu Fig. 3 bis 7 erfolgt untenstehend keine weitere Erläuterung und Beschreibung. Vielmehr wird zur Vermeidung von Wiederholungen auf die Ausführungen in der Beschreibungseinleitung verwiesen.

Das erfindungsgemäße Herstellungsverfahren wird weiter anhand des nachfolgend wiedergegebenen Quellenprogramms für einen Trassenalgorithmus veranschaulicht, das die Bestimmung einer äquidistanten Punktfolge mit konstanter n-ter Richtungsdifferenz zum Gegenstand hat.

Als FORTRAN 77-Quellenprogramm hat der Trassenalgorithmus die folgende Form:

```

      DOUBLE PRECISION RHO,STAT,Y,X,AN
      DOUBLE PRECISION RIGO,DRIGO,D2RIGO,RIBO
      RHO=(200.D0)/(4.D0*DATAN(1.D0))
      READ(*,10)STAT,Y,X,AN,RIGO,DRIGO,D2RIGO
10  FORMAT(7F.....)
      WRITE(*,11)STAT,Y,X,AN,RIGO,DRIGO,D2RIGO
11  FORMAT(1X,7F.....)
100  RIBO=RIGO/RHO
      Y=Y+AN*DSIN(RIBO)
      X=X+AN*DCOS(RIBO)
C
      STAT=STAT+AN
C
      D3RIGO=...
C
      D2RIGO=...
      DRIGO=DRIGO+D2RIGO
      RIGO=RIGO+DRIGO
C
      WRITE(*,20)STAT,Y,X,RIGO,DRIGO,D2RIGO
20  FORMAT(1X,6F.....)
      AUS=0.0

```



```

      READ(*,12)AUS
12  FORMAT(F16.8)
C    <ENTER-TASTE> oder 9.99<ENTER>
      IF(AUS)100,100,1
C    Änderung von D2RIGO und DRIGO
1  READ(*,*)D2RIGO
      GO TO 100
      END

```

Abspeichern, übersetzen, linken. Aufruf des Produktionslaufs. Eingabe der Anfangswerte im gewählten FORMAT.

<ENTER> oder 9.99 <ENTER> neues D2RIGO und <ENTER> DRIGO wird mit D2RIGO in zwei oder mehr Schritten geändert. Im Kreis macht man D2RIGO zu Null. Beendigung durch Abschalten, Warmstart oder <Ctrl+C>.

Dieser Algorithmus erzeugt eine äquidistante Punktfolge mit konstanter n-ter Differenz der Richtung nach der unten aufgeführten n-stufigen Rekursion. In ihr sind die Richtungen RIGO in Gon und RIBO im Bogenmaß durch  $\tau$  bezeichnet ( $\tau = \text{RIBO}$ )

$$Y_{i+1} = Y_i + AN * \sin \tau_i$$

$$\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta \tau_{i,i-1}$$

$$\Delta \tau_{i,i-1} = \Delta \tau_{i-1,i-2} + \Delta^2 \tau$$

etc.

$$X_{i+1} = X_i + AN * \cos \tau_i$$

mit den Anfangswerten  $y_0, x_0, AN, \tau_0, \tau_0, \Delta^2 \tau$ .

$\Delta^2 \tau = 0$  bedeutet  $n=2$  den (einfachsten) Übergangsbogen.

$\Delta^2 \tau = 0$  und  $\Delta \tau = 0$  bedeutet  $n=1$  konstante Richtungsänderung, also Punkte auf dem Kreis.  $\Delta \tau = 0$  bedeutet  $\tau_0 = \tau_i$  und damit unveränderliche Richtung, also Gerade.

Im folgenden werden Betrachtungen zur numerischen Stabilität des erfindungsgemäßen Verfahrens anhand von kreisförmigen Trassen angestellt.

Nachdem gezeigt war, daß der Trassenalgorithmus über Richtungs-differenzen genau dieselben Zahlenwerte liefert wie die Klotoide über Reihenentwicklungen, interessierte die numerische Stabilität des Zusammenwirkens so vieler Differenzschritte. Da Kreise in sich selbst zurückkehren, kann an ihnen die numerische Stabilität der Trasse über lange Strecken besonders gut geprüft werden.

Das gleichseitige Vieleck bei der kreisförmigen Trasse ist ein Polygonzug mit sehr vielen sehr kurzen Seiten. Dieser Polygonzug ist jedoch frei von Zentrierfehlern und verhält sich daher anders als ein Polygonzug im Gelände.

Ein Überblick über die Testrechnungen zeigt: Wenn alle Variablen und Konstanten mit DOUBLE PRECISION arbeiten, dem Algorithmus insbesondere  $\pi$  und mit 16 signifikanten Stellen zur Verfügung gestellt werden, kehren die mit Richtungs-differenzen gerechneten Kreise noch nach über 100 km und über 100 000 Differenzschritten mit feinmechanischer Präzision in sich zurück. Damit wiederholt sich eine Erfahrung, die schon bei der Nachrechnung der Tabellen der Fresnelschen Integrale überrascht hat: Der Algorithmus hat eine große numerische Stabilität.

Die numerische Stabilität ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von Rechenalgorithmus und Rechenanlage. Verwendet wurde ein IBM Personal System/2 Modell 80X21 mit 80387 Math. Co-Prozessor und IBM FORTRAN/2 Compiler. Dieser Compiler wickelt alle Berechnungen über den Co-Prozessor 80387 im Format "temporary real" ab, gleichgültig welcher Datentyp das Argument oder das Resultat hat [IBM 1987 D-13,14]. Die 8 Register des 80387 für "temporary real" haben 80 Bit, 64 da-

von sind Mantisse, 1 ist Vorzeichen, 15 sind Exponent. 64 Bit bedeutet 19 dezimale Stellen [Sargent, M., Shoemaker, R.: The IBM Personal Computer from the inside out, Seite 162, Addison-Wesley 1988]. Mit dieser Genauigkeit werden zum Argument X über den partiellen Tangens FPTAN(X) zwei Werte A und B gebildet, so daß  $\text{TAN}(X)=A/B$  ist.  $C=\text{SQRT}(A*A+B*B)$ ,  $\text{SIN}(X)=A/C$  und  $\text{COS}(X)=B/C$  entsteht in den Registern des 80387 mit 19 signifikanten dezimalen Stellen. Für DOUBLE PRECISION werden diese Werte auf 16 dezimale Stellen (8 Bytes Hex) gerundet.

Jeder Sinus- und Cosinuswert hat damit einen Fehler  $\delta$  mit  $-0,5*10^{-16} \leq \delta \leq +0,5*10^{-16} = \epsilon$ . Wird mit dem Algorithmus von A zum Nachbarpunkt N mit  $DY = AN*\sin r$  und  $DX = AN*\cos r$  weitergerechnet, so hat jeder der beiden Koordinatenunterschiede einen maximalen Fehler von  $AN*\epsilon$  und die relative Punktlage von A und N einen solchen von  $AN*\epsilon/2$ .

Rechnet man jedoch A und N vom Kreismittelpunkt aus, mit  $y=r*\sin r$  und  $x=r*\cos r$ , so ist die Klaffung für A und N jeweils maximal  $r*\epsilon*\sqrt{2}$ , was für AN im ungünstigsten Fall  $r*\epsilon*\sqrt{2}*2$  ergibt. Die Relation für die Nachbargenauigkeit beider Berechnungswege verhält sich wie  $(AN*\epsilon*\sqrt{2})/(r*\epsilon*2*\sqrt{2}) = AN/2r$ . Bei  $r=60\text{km}$  und  $AN=1\text{m}$  ist das ein Verhältnis von 1/120 000. Der mit dem Richtungsalgorithmus über seinen Rand gerechnete Kreis hat die besseren Nachbarschaftseigenschaften. Er ist runder.

Ansprüche

1. Verfahren für den Bau von durch Ort, Richtung und Krümmung im Anfangs- und Endpunkt (A, E) sowie durch vorgegebene Zwangspunkte ( $Z_1, Z_2, \dots$ ) verlaufenden Spurführungseinrichtungen und Verkehrsbändern für Fahrzeuge, bei dem mittels einer Verarbeitungseinrichtung der Trassenverlauf unter Anwendung eines Richtungsdifferenzverfahrens bestimmt wird derart, daß die Trassenkrümmung und Krümmungsänderung vorgegebene Werte für ein stabiles Fahrverhalten der Fahrzeuge nicht überschreiten, der Trassenverlauf im Gelände durch Trassenzwischenpunkte (A,  $A_1, A_2, \dots$ ) sukzessive festgelegt wird und die Trassenzwischenpunkte durch Trassenabschnitte (A,  $A_1$ ;  $A_1, A_2$ ; ...) verbunden werden, wobei bestimmte Abstände zwischen den Trassenzwischenpunkten und die erste, zweite sowie dritte Richtungsdifferenz so festgelegt werden, daß sie die vorgegebenen Zwangspunkte ( $Z_1, Z_2, \dots$ ) enthalten.
2. Verfahren zur Konstruktion von Gegenständen unter Verwendung eines CAD-Systems, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberfläche und/oder Form eines herzustellenden Gegenstandes unter Verwendung eines Richtungsdifferenzverfahrens mittels Oberflächenzwischenpunkten räumlich festgelegt wird, wobei bestimmte Abstände zwischen den Oberflächenzwischenpunkten und die erste, zweite sowie dritte Richtungsdifferenz festgelegt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Trassenabschnitte (A,  $A_1$ ;  $A_1, A_2$ ; ...) bzw. Abschnitte zwischen den Oberflächenzwischenpunkten Geradenstücke sind, wobei die Abschnitte aneinander gereiht einen Polygonzug ergeben.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Trassen- bzw. Ober-

flächenzwischenpunkte zur Festlegung des Trassen- bzw. Oberflächenverlaufs in äquidistanten Abständen angeordnet werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die vierte und/oder höhere Richtungsdivergenz vorgegeben werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die n-te Differenz der Richtung konstant ist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Abstände zwischen den Trassen- bzw. Oberflächenzwischenpunkten variiert werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1, 3 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Trassenzwischenpunkte direkt zur punkweisen Absteckung der Trassenachse verwendet werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Richtungsdivergenzen insbesondere funktionsabhängig variiert werden.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Richtung der Trasse bzw. der Oberfläche in einem Zwangspunkt ( $Z_i$ ) durch die Richtung der Tangente eines Kreises gegeben ist, der durch den Zwangspunkt ( $Z_i$ ) und dessen beide benachbarte Zwangspunkte ( $Z_{i-1}$ ,  $Z_{i+1}$ ) verläuft.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Streckenabschnitte ( $A$ ,  $A_1$ ;  $A_1$ ,  $A_2$ ; ...) als miteinander verbundenene Mikro-sehenpolygone durch die Zwangspunkte ( $Z_1$ ,  $Z_2$ , ...,  $Z_n$ ) ausge-

führt werden, deren maximale Richtungsänderung ein Minimum ist.

12. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1, 3 bis 11 zum Bau von Schienentrassen von der Hochgeschwindigkeitstrasse bis zur Straßenbahntrasse.

13. Anwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 10 auf CNC-Steuerungen.

14. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 10 zur Herstellung von Karosserieteilen, Werkstücken, Motorteilen sowie von Industriedesign.

15. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 10 zur Herstellung von Prothesen.

1/8

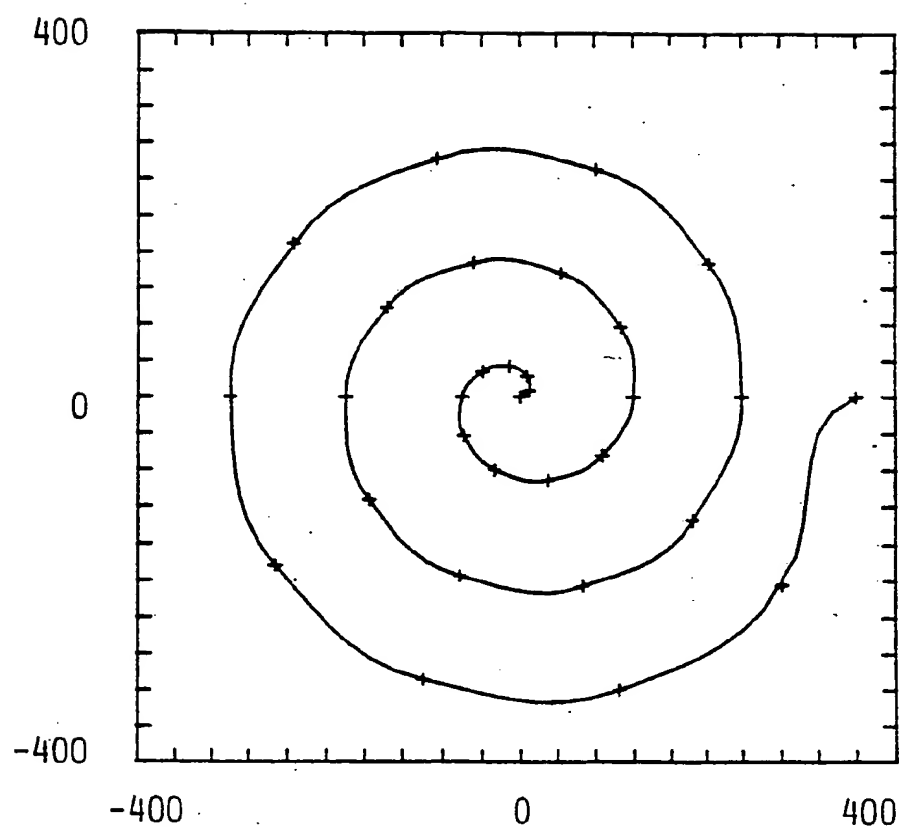


FIG. 1

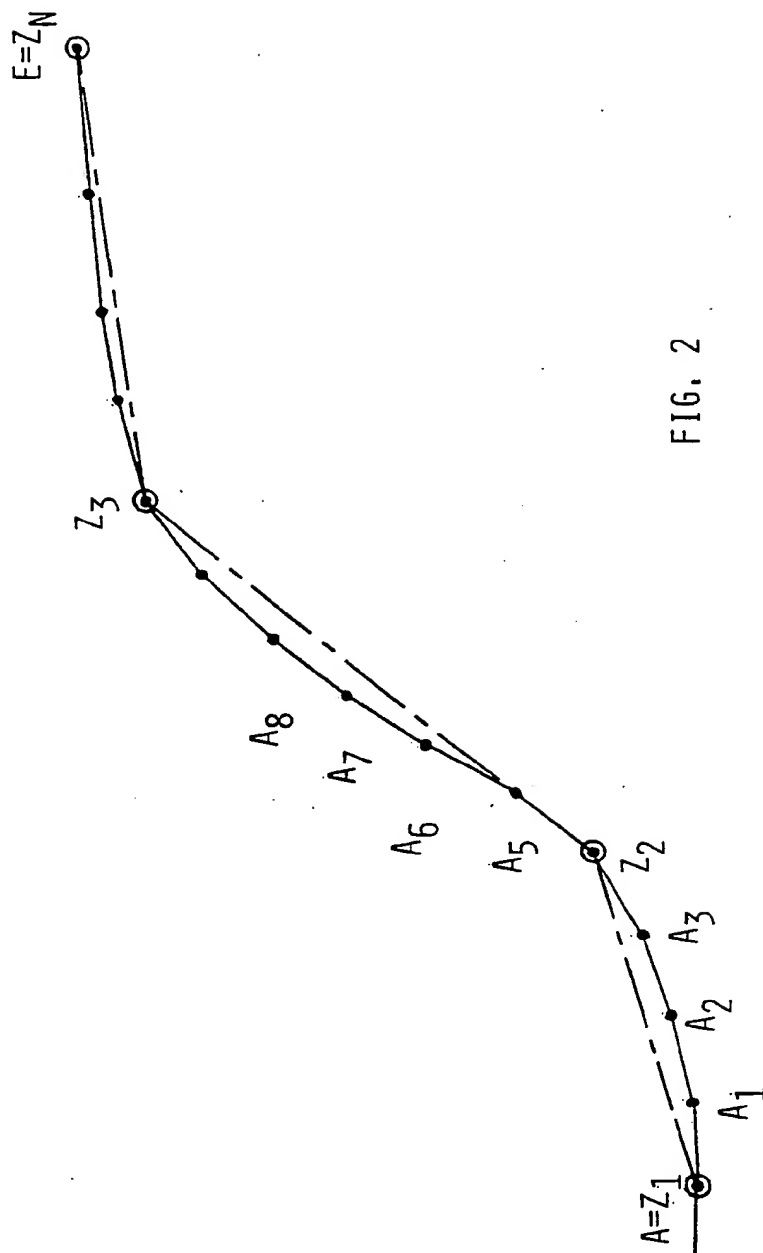
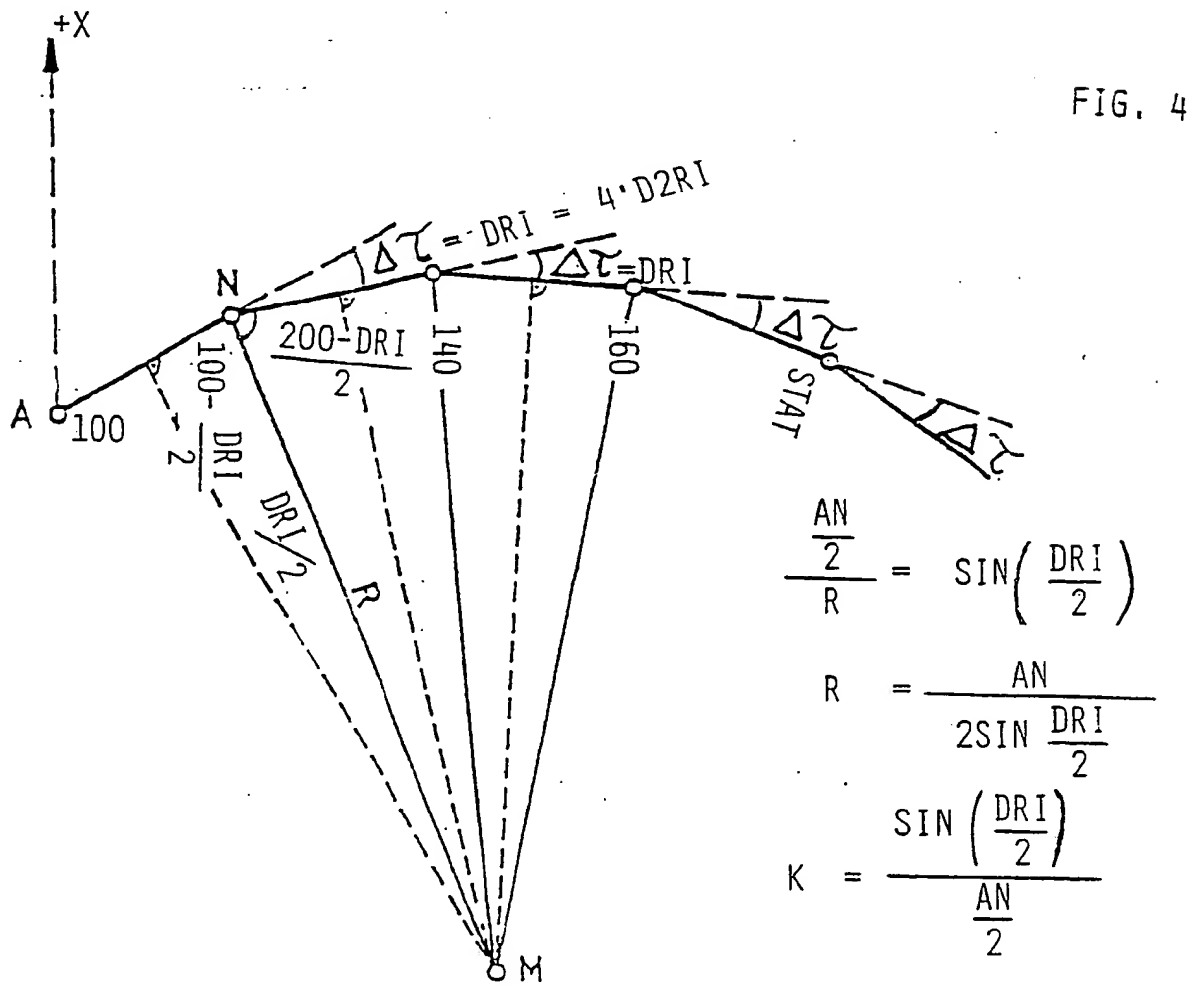
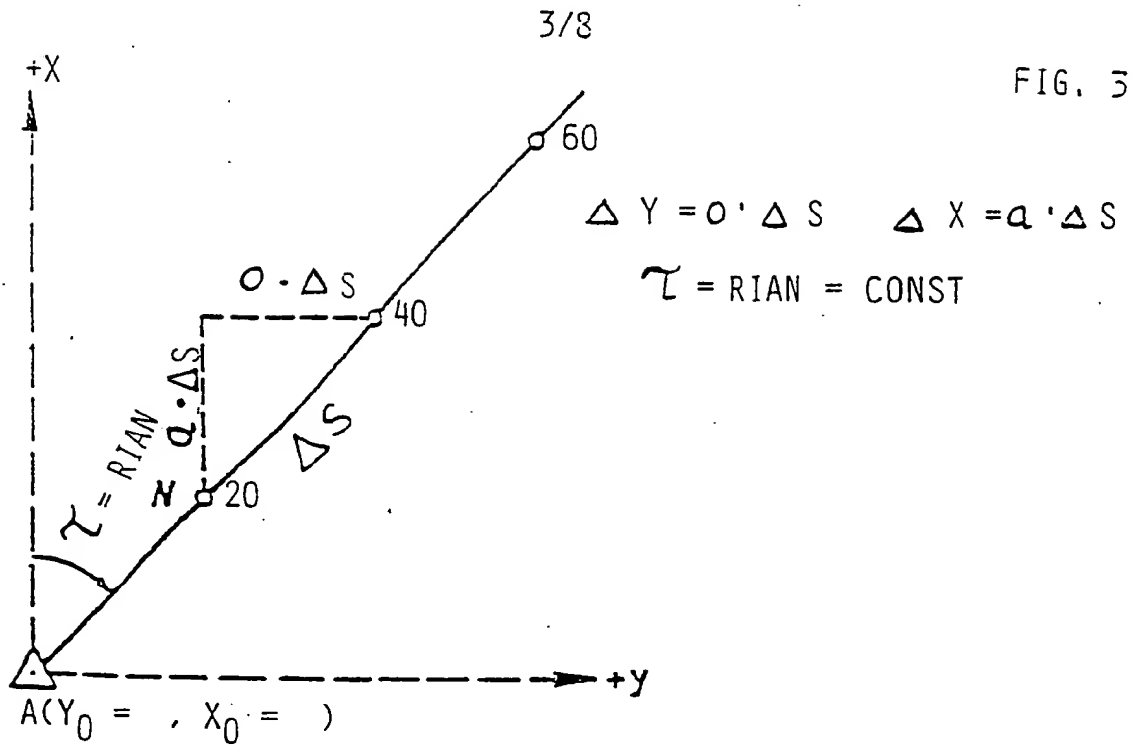


FIG. 2





$$\frac{\frac{AN}{2}}{R} = \sin\left(\frac{DRI}{2}\right)$$

$$R = \frac{AN}{2 \sin \frac{DRI}{2}}$$

$$K = \frac{\sin\left(\frac{DRI}{2}\right)}{\frac{AN}{2}}$$

4/8

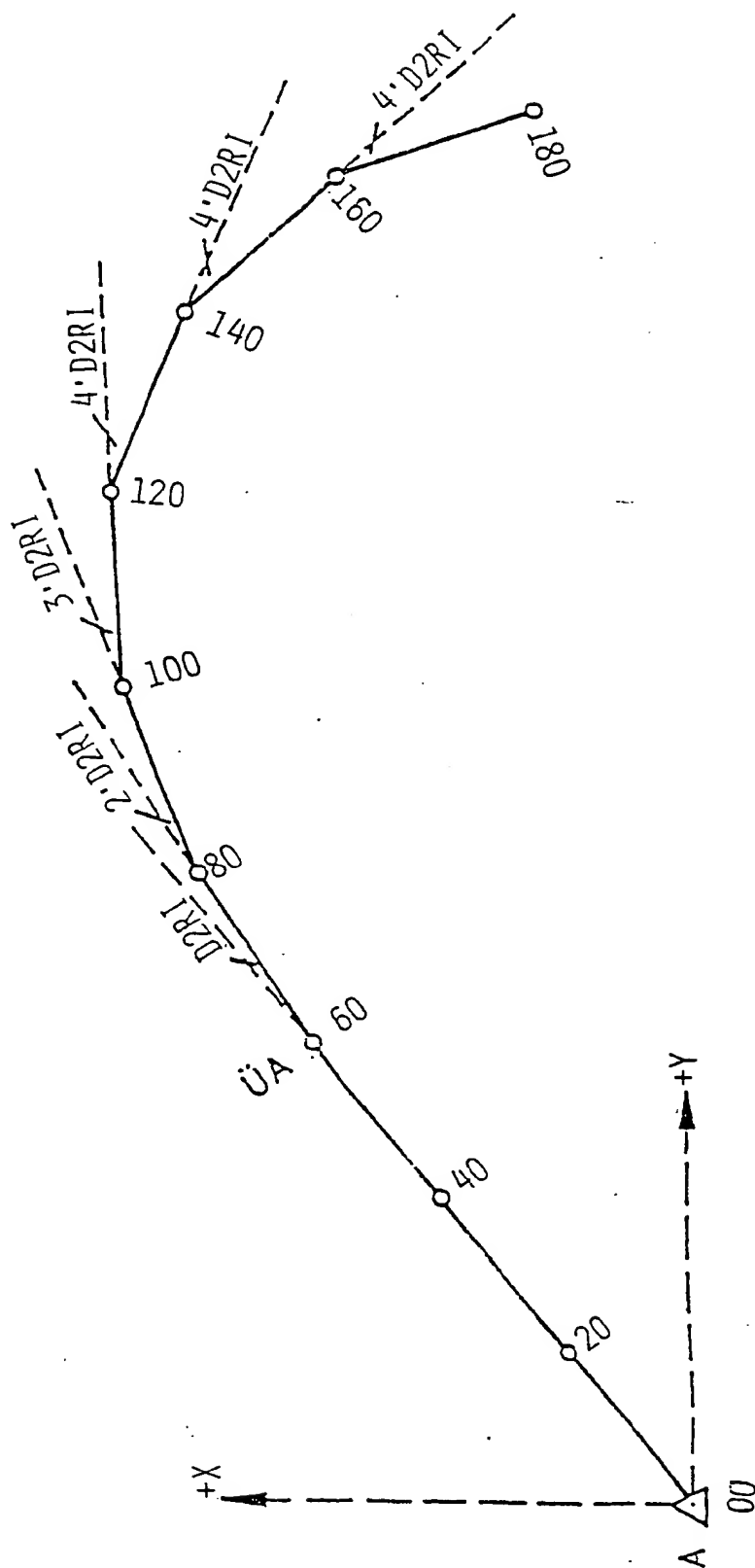


FIG. 5

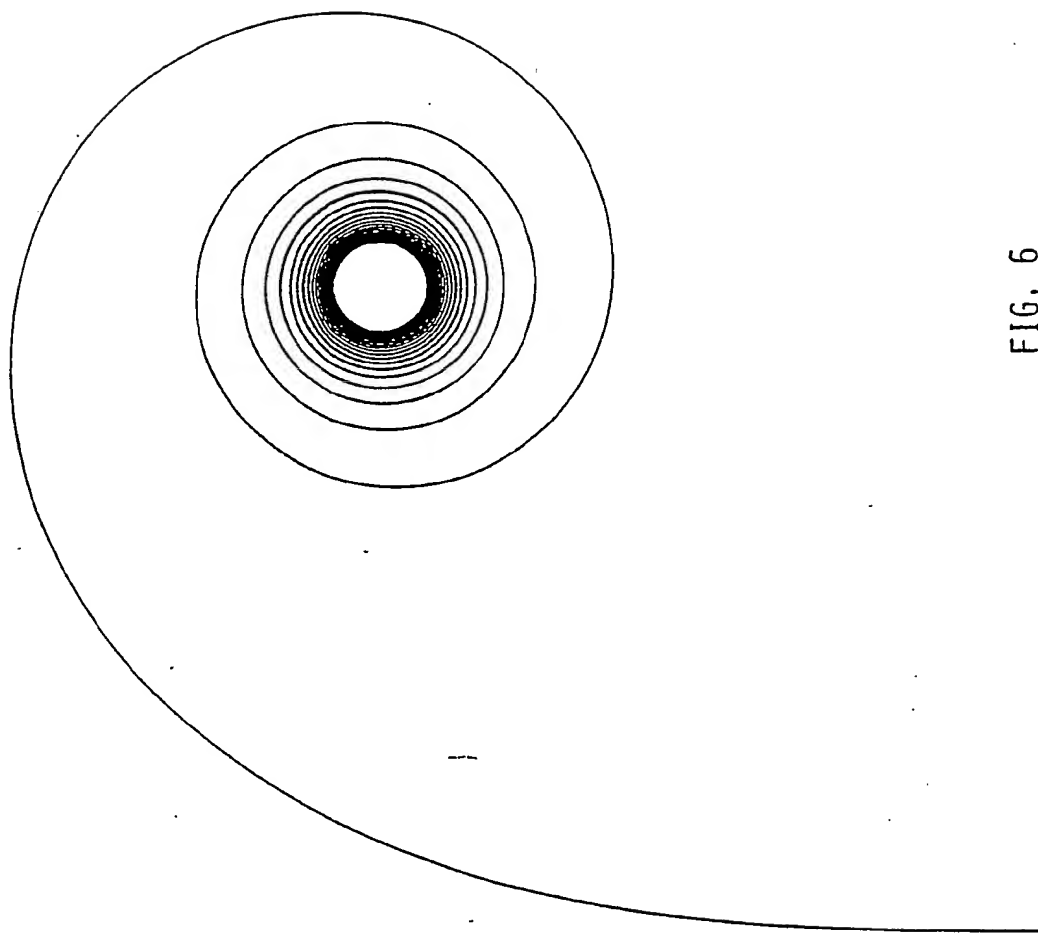


FIG. 6

6/8

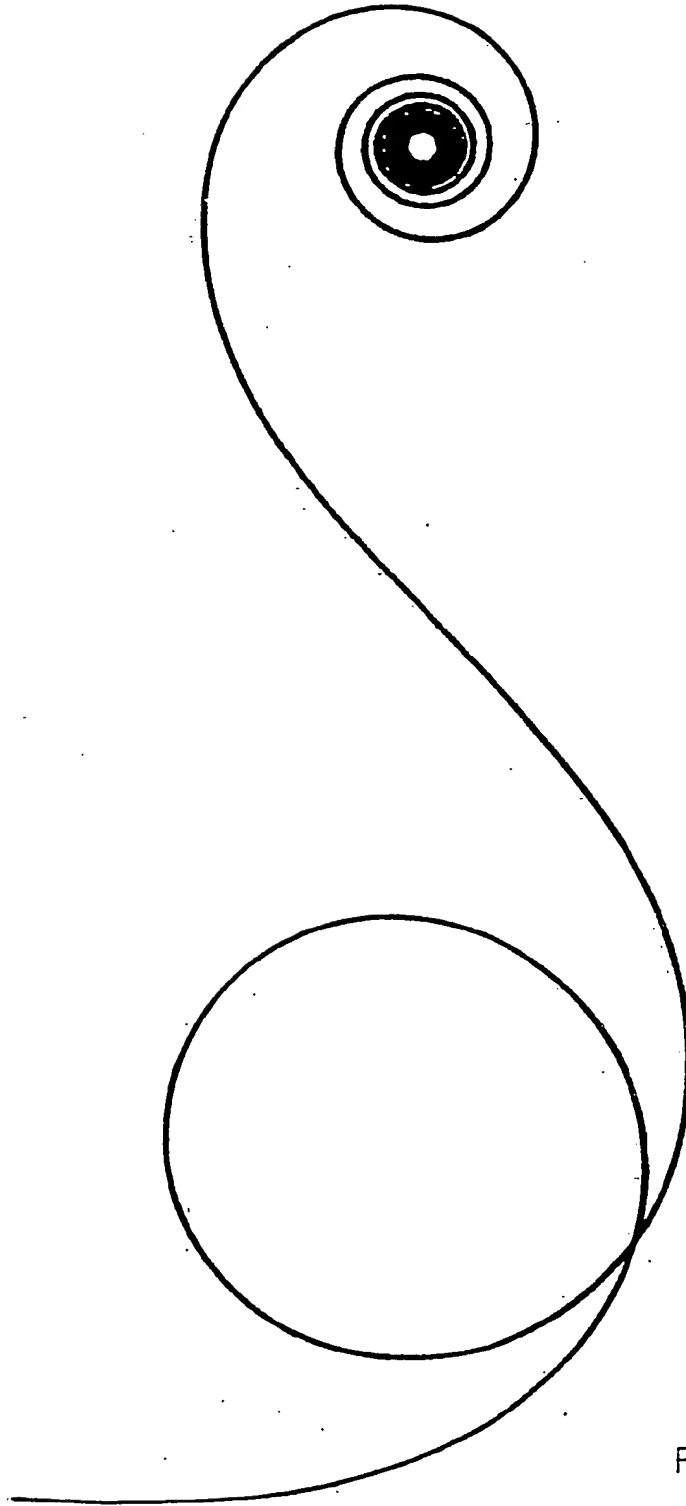


FIG. 7

7/8

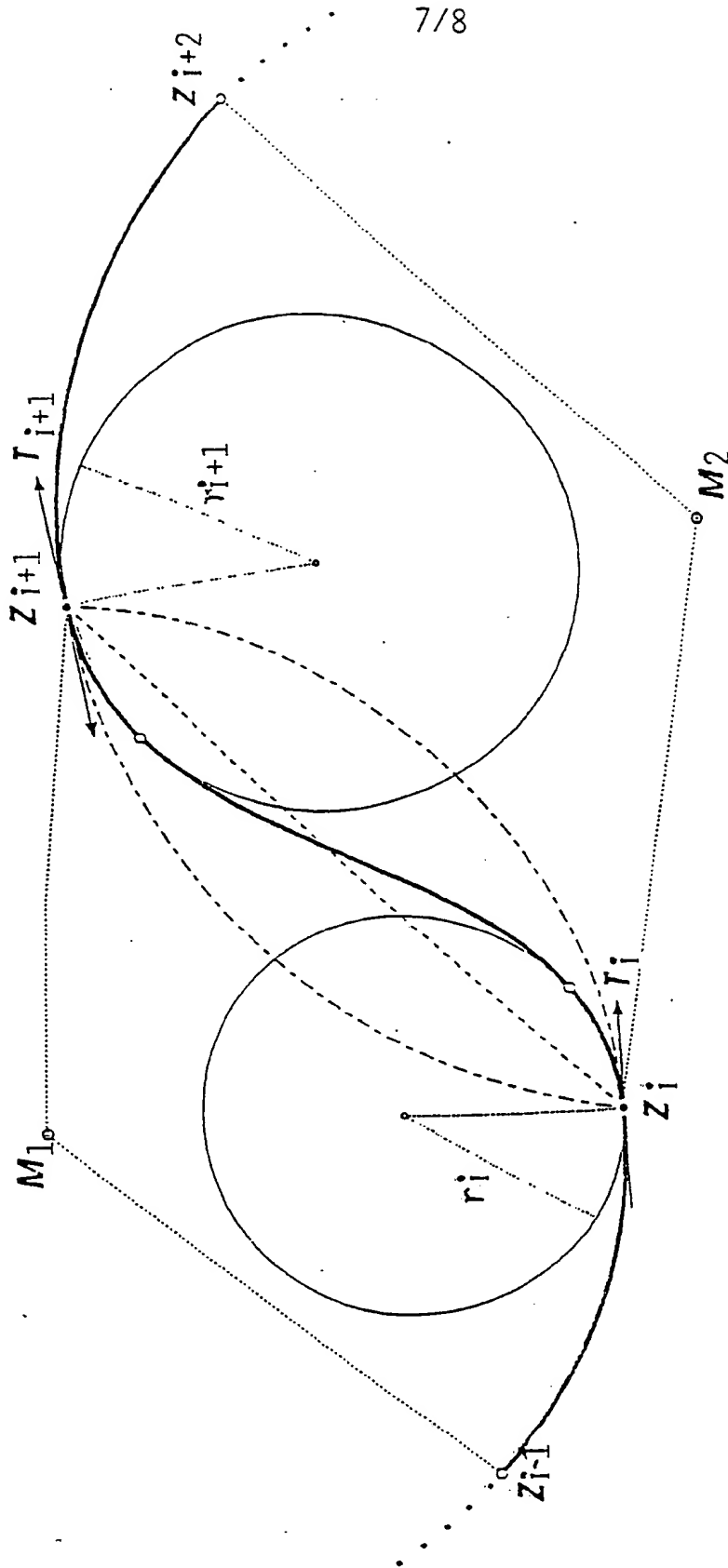


FIG. 8

ERSATZBLATT

8/8

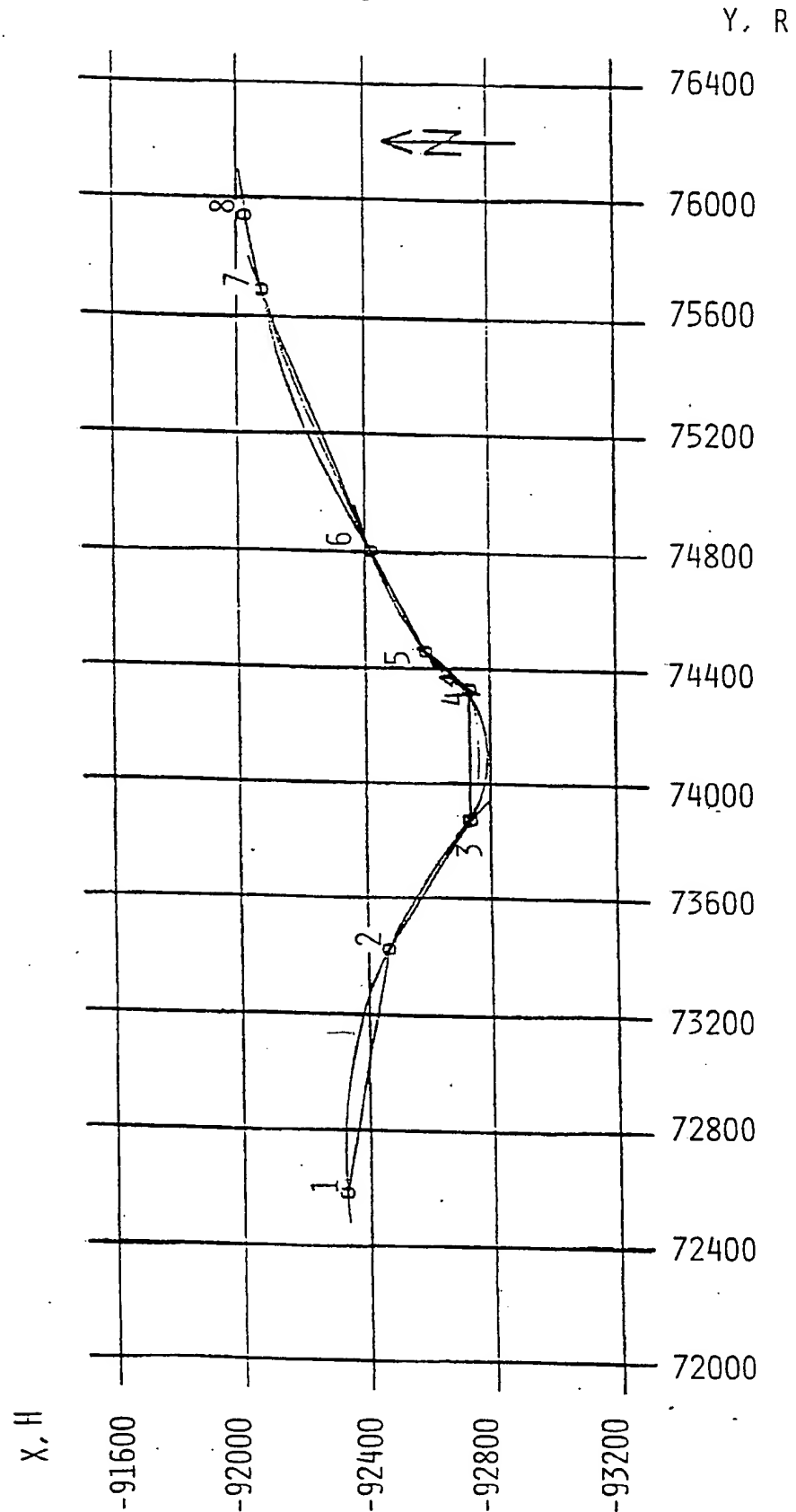


FIG. 9

DE 44 01 200 A1